

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Studium polarizační módové disperze**  
**Study of Polarization Mode Disperzion**

**2013**

**Martin Chrenšć**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Martin Chrenš**

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Studium polarizační módové disperze  
Study of Polarization Mode Disperzion

Zásady pro vypracování:

1. Popis PMD
2. Možnosti měření PMD
3. Možnosti potlačení PMD
4. Experimentální měření PMD

Seznam doporučené odborné literatury:


SHARMA, R. L., Ranjit SINGH a Vinod KUMAR. Polarization Mode Dispersion (PMD), its limits, compensation and effect on optical fiber networks. Journal of computing. 2011, roč. 2011, č. 8. ISSN 2151-9617. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/64328412/Polarization-Mode-Dispersion-PMD-its-limits-compensation-and-effect-on-optical-fiber-networks>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

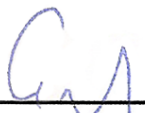
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Pápeš**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

  
prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

Dňa: 2.5. 2013

.....  
podpis študenta

## **Pod'akovanie**

Rád by som pod'akoval Ing. Martinovi Pápešovi za odbornú pomoc a konzultáciu pri vytváraní tejto bakalárskej práce.

## **Abstrakt**

Táto práca sa zaoberá polarizačnou módovou disperziou (PMD) a jej vplyvmi na prenos optického signálu optickými vláknami. Na začiatku práce je popísaný pojem disperzia v optických vláknach, ako taký s osobitným zameraním na polarizačnú módovú disperziu. Ďalej sú v práci popísané príčiny vzniku polarizačnej módovej disperzie, jej vplyvy na prenášaný signál a možnosti jej potlačenia. V nasledujúcich kapitolách sú popísané možnosti merania PMD. Posledná časť práce je venovaná samotnému praktickému meraniu PMD v optických vláknach, vyhodnoteniu nameraných výsledkov a ich porovnaniu s technickými normami.

## **Kľúčové slová**

Polarizačná módová disperzia, PMD, optika, optické vlákna, meranie PMD, kompenzácia PMD.

## **Abstract**

This work deals with the polarization mode dispersion (PMD) and its effects on the optical signal distribution in optical fibers. At the beginning of the work the term dispersion in optical fibers itself is described and, with particular focus on the polarization mode dispersion. Next, the causes of the polarization modes of dispersion, its effects on the transmitted signal and the possibilities its suppression are described. The following sections describe the options of PMD measurements. The last part is devoted to the practical measuring of PMD in optical fibers, the evaluation of the measurement results and their comparison with the standards.

## **Key words**

The polarization mode dispersion, PMD, optics, optical fibers, measuring PMD, compenzation PMD.

## Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$\Delta n$		Efektívny index lomu medzi pomalým a rýchlym režimom
$\Delta \tau$	ps	DGD
$\Delta x$	nm	Skenovacia vzdialenosť
$\Phi_{\max}$		Maximálne fázové oneskorenie
$\Phi_{\min}$		Minimálne fázové oneskorenie
$\omega$	rad*s <sup>-1</sup>	Uhlová rýchlosť
$L$	km	Dĺžka vlákna
$L_c$	km	Koherentná dĺžka vlákna
$c$	m*s	Rýchlosť svetla
$f_m$	Hz	Modulačná frekvencia
$n_s$		Pomalý režim šírenia svetla
$n_f$		Rýchly režim šírenia svetla
$\hat{p}$		Pomalší PSP
$\neg p$		Rýchlejší PSP

## Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
<b>BER</b>	Bit Error Rate	Bitová chybovosť
<b>CRZ</b>	Pre-chirped RZ	
<b>DCM</b>	DispersionCompensation Modules	Disperzné kompenzačné moduly
<b>DFE</b>	Decision feedback equalizer	Rozhodovací spätno-väzobný ekvalizér
<b>DGD</b>	Differential Group Delay	Diferenciálne skupinové oneskorenie
<b>DMS</b>	Dispersion-managed solitons	Disperzne riadené solitony
<b>DOF</b>	Degrese Of Freedom	Stupeň voľnosti
<b>DOP</b>	Degree of Polarization	Stupne polarizácie
<b>EDFA</b>	Erbium-Doped Fiber Amplifier	
<b>GVD</b>	Group velocitydispersion	Skupinová rýchlosť disperzie
<b>LDV</b>	Link design value	Linková návrhová hodnota
<b>NRZ</b>	Non-return-to-zero	Nenavráť do nuly
<b>PDL</b>	Polarization dependent loss	Stratovo závislá polarizácia
<b>PM (fiber)</b>	Polarization maintaining (fiber)	Polarizáciu udržiujúce (vlákna)
<b>PMD</b>	Polarization mode disperzion	Polarizačná módová disperzia
<b>PMD<sub>Q</sub></b>	PMD coefficient	Koeficient PMD
<b>PSP</b>	Principal States of Polarization	Principiálny stavový model
<b>RZ</b>	Return-to-zero	Návrat do nuly
<b>SOP</b>	States of polarization	Stavy polarizácie
<b>TF</b>	Transversal filter	Transverzálny filter
<b>WDM</b>	Wavelength-division multiplexing	Vlnový multiplexing



# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Polarizačná módová disperzia v optických vláknach.....	2
2.1	Jednomódové optické vlákna a PMD .....	3
2.1.1	PMD v krátkych vláknach .....	3
2.1.2	PMD v dlhých vláknach .....	4
2.2	Diferenciálne skupinové oneskorenie DGD .....	5
2.2.1	Štatistická podstata polarizačne módovej disperzie .....	5
2.3	Polarizácia svetla a dvojlom.....	6
2.4	PMD vektor .....	7
2.5	PMD v prítomnosti stratovo závislej polarizácie (PDL) .....	8
2.6	Emulácia PMD .....	8
2.6.1	Emulátor s pevnou orientáciou .....	8
2.6.2	Emulátor s otočnými sekciami .....	9
2.6.3	Emulátor s premenlivými DGD prvkami .....	9
2.7	PMD tolerancia rôznych modulačných formátov.....	10
3	PMD a kompenzačné techniky.....	12
3.1	Elektrická PMD kompenzácia.....	12
3.2	Optické PMD kompenzátory .....	12
4	Meranie PMD.....	14
4.1	Metódy merania PMD .....	15
4.1.1	Metóda impulzného oneskorenia.....	15
4.1.2	Metóda modulácie fázového posuvu .....	15
4.1.3	Metóda Poincarovho oblúka.....	16
4.1.4	Metóda pevného analyzátora .....	16
4.1.5	Jonesova maticová metóda .....	17
4.1.6	Interferometrická metóda .....	18
5	Experimentálne meranie PMD .....	20
5.1	Použité prístroje a pomôcky .....	20
5.2	Schémy zapojenia.....	21
5.2.1	Ukážka zapojenia.....	22
5.3	Meranie PMD bez emulátora EXFO EM550 .....	22
5.4	Meranie PMD s emulátorom EXFO EM550 .....	24
6	Záver.....	29
	Použitá literatúra .....	30

---

# 1 Úvod

V dnešnej dobe sa v telekomunikáciách kladú veľké nároky na rýchlosť prenosu informácií, čo je spôsobené veľkým rozvojom a pokrokom technológií, ktoré využívame v bežnom živote. Užívatelia začínajú využívať telekomunikačné služby, ktoré pre svoju bezproblémovú funkčnosť potrebujú vysoké prenosové rýchlosti. Do popredia sa dostáva sledovanie priamych prenosov televízneho vysielania vo vysokom rozlíšení, výmena dát a vzdialené ovládanie zariadení v reálnom čase. To nás vedie k diskusii, ako zvýšiť rýchlosť u používateľa.

Optické vlákna, ktoré spĺňajú parametre potrebné pre prenos vysokými rýchlosťami, sú čoraz viac používané a tento trend sa zvyšuje. Optické vlákno je skonštruované z jadra, ktoré je vyrobené z kremičitého skla alebo plastu. Pri prechode svetelného lúča optickým vláknom sa prenáša zvolená informácia. Výhodami optických vlákien sú ich malé rozmery a váha, ako aj ich použitie v elektricky problematických prostrediach vďaka ich elektrickej izolácii. Sú odolné voči elektromagnetickým vplyvom a presluchom a na rozdiel od koaxiálnych káblov majú mnohonásobne väčšie prenosové pásmo. Výhodou je tiež, že pri prenose svetelnej energie dochádza len k malým prenosovým stratám signálu.

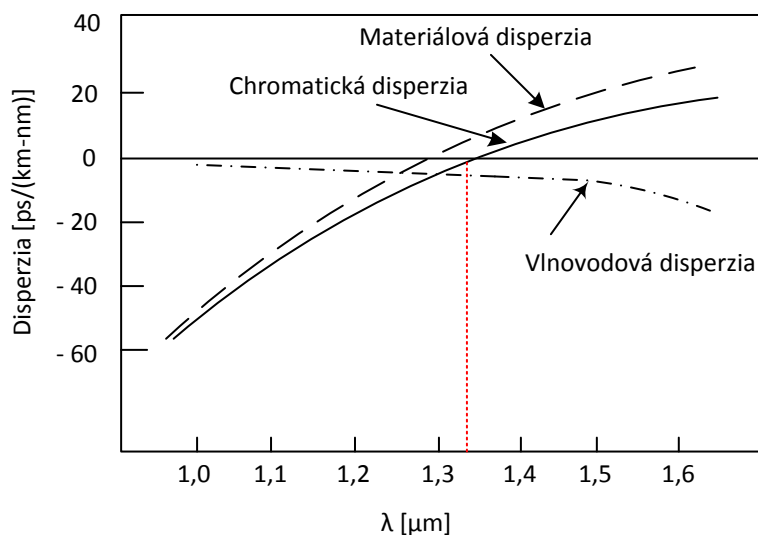
Ale tak ako aj na iných spojeniach, či už metalických alebo bezdrôtových, tak aj na optické vlákna pôsobia negatívne vlastnosti. Tieto negatívne vplyvy výrazne ovplyvňujú vlastnosti optických vlákien. Jadro optického vlákna je z krehkého materiálu, čo spôsobuje vysokú citlivosť na mechanické namáhanie a ohyb. Ďalšou nevýhodou je zložitosť technológie výroby super čistých skiel. Problémom môže byť aj spájanie jednotlivých vlákien. Veľká pozornosť sa venuje jednému z hlavných negatívnych vlastností optických vlákien, a to polarizačnej módovej disperzii, ktorá ovplyvňuje prenos a výrazne obmedzuje rýchlosti prenosu signálu pri vyšších rýchlostiach. Polarizačná módová disperzia sa v dnešnej dobe nedá úplne eliminovať, dá sa len potláčať. Otázke polarizačnej módovej disperzie sa venujeme aj v tejto práci.

## 2 Polarizačná módová disperzia v optických vláknach

Disperzia je jav, ktorý negatívne ovplyvňuje prenosové vlastnosti optických vlákien. Pri prechode vláknom disperzia spôsobuje rozširovanie optických impulzov, ktoré sa vzájomne negatívne ovplyvňujú. Takéto javy sú popísané ako módová disperzia, chromatická disperzia a polarizačná módová disperzia. Pri viacmódových vláknach sa šíri signál rôznymi módmi, preto sú časy prenosu často rozdielne. To spôsobuje, že sú jednotlivé módy voči sebe oneskorené, čo je príčina rozšírenia prenášaného impulzu.

Módová disperzia, ktorá je spôsobená odlišnou veľkosťou prenosových ciest pre jednotlivé módy, je v jednomódových optických vláknach eliminovaná.

Chromatická disperzia je v jednomódových vláknach výrazná. Chromatická disperzia je výrazne závislá od svetelného zdroja a od jeho frekvenčného pásma. Aby bola disperzia menšia, musí byť aj toto pásmo malé. Pri rozdielnej vlnovej dĺžke sa disperzia zväčšuje. Vzniká tým spôsobom, že impulz, ktorý sa šíri vláknom, je pôsobením disperzie rozšírený a na konci vlákna sa tieto impulzy začínú prekrývať. Súčet vlnovodovej a materiálnej disperzie určuje chromatickú disperziu, vid', obrázok 2.1. [2]



Obrázok 2.1: Chromatická disperzia ako súčet materiálnej a vlnovodovej disperzie [2]

Účinok PMD bol prvýkrát zaznamenaný v prenosoch káblovej televízie vďaka senzitívnemu charakteru analógového signálu. S narastajúcou prenosovou rýchlosťou dopad na spoľahlivosť, dosah a šírku vlnového pásma v sústavách jednomódového optického vlákna bude zreteľnejší, keď začne pôsobiť na prenosy na krátke vzdialenosti. Ďalšie problémy sú, že PMD je nepravidelný jav a často sa nedá presne nmerať.[1]

## 2.1 Jednomódové optické vlákna a PMD

V jednomódovom optickom vlákne spôsobuje negatívne vlastnosti polarizačná módová disperzia. Často sa porovnáva s chromatickou disperziou, ktorá je v jednomódových vláknach výraznejšia, ale PMD v dnešnej dobe predstavuje väčší problém, keďže nie je konštantná.

Jednomódovým optickým vláknom sa v skutočnosti šíria dva módy, ktoré sú ortogonálne polarizované. V ideálnom optickom vlákne tieto dva módy prechádzajú rovnakou rýchlosťou, avšak v reálnych vláknach majú módy rôzne rýchlosti šírenia. To je zapríčinené asymetriami a chybami vo vnútri vlákien. Asymetria optického vlákna vzniká, keď je jadro vlákna oválne. Vlastná asymetria vlákna je konštantná, ale mechanické namáhanie v dôsledku narábania s vláknami spôsobuje ďalšiu asymetriu. Optické vlákno môže byť mechanicky namáhané z rôznych príčin. Zmena teploty okolia, v ktorom je optické vlákno položené, je jedna z príčin, ktorú je veľmi ťažké kontrolovať. Väčšina optických vlákien je umiestnená pod povrchom alebo v potrubí, ale aj tak sú vystavené príčinám mechanického namáhania. Pre vyhnutie sa stavbám sú vlákna často krát uložené popri železničnej trati, čo spôsobuje mechanické namáhanie spôsobené vibráciami, ktoré negatívne vplyvajú na vlastnosti vlákien. Iné vlákna môžu byť uložené nad zem, kde na vlákna pôsobí vietor, čo spôsobuje ďalšie mechanické namáhanie a vznik PMD, čo má za následok spomalenie systému pri vysokorýchlostných prenosoch. Všetky tieto vplyvy sú nepredvídateľné, preto PMD nie je konštantná hodnota. PMD taktiež spôsobuje spomalenie systému pri vysokorýchlostných prenosoch.

Táto asymetria nám spôsobí efekt známy ako dvojlom (dvojitý optický lom), ktorý je úmerný rozdielu v indexoch lomu dvoch základných rovín. Ako sa polarizácia uvoľňuje pozdĺž jednomódového vlákna, môže vyslať impulz, ktorý vystačí na to, aby sa prekrýval s inými impulzmi alebo aby zmenil svoj tvar tak, že nebude detekovateľný v prijímači.[1]

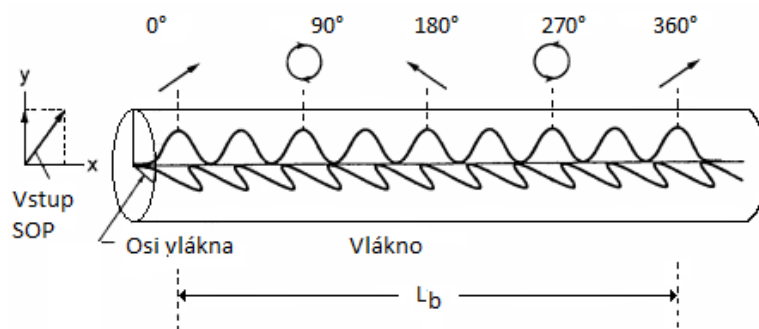
### 2.1.1 PMD v krátkych vláknach

Ak dĺžka vlákna ( $L$ ) je oveľa menšia ako koherentná dĺžka ( $L_c$ ), potom je vlákno nazývané ako krátke vlákno. V krátkom vlákne môže byť považovaný dvojlom ako jednotný a módové spojenie chýba. Dvojlom v krátkom vlákne môže byť vyjadrený ako rozdiel šírenia konštánt pomalých a rýchlych režimov:

$$\Delta\beta = \frac{\omega * n_s}{c} - \frac{\omega * n_f}{c} = \frac{\omega * \Delta n}{c} \quad (2.1)$$

Kde  $\omega$  je uhlová optická frekvencia,  $c$  je rýchlosť svetla, a  $\Delta n = n_s - n_f$  je efektívny index lomu medzi pomalým a rýchlym režimom.

V krátkych vláknach pre daný vstupný polarizačný stav sa stav polarizácie vyvíja v cyklickom móde tak, ako sa svetlo šíri cez vlákno. To znamená od lineárne na elipsovité až po kruhový a späť cez elipsovité na lineárny stav tak, ako je zobrazené na obrázku 2.2.



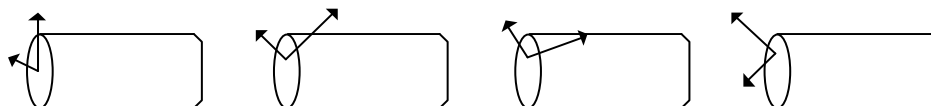
Obrázok 2.2: Priestorový vývoj polarizácie spôsobený jednotným dvojlomom [6]

Vzhľadom na absenciu módového spojenia v krátkych vláknach sa DGD hromadí lineárne s dĺžkou vlákna.[6]

### 2.1.2 PMD v dlhých vláknach

Ak dĺžka vlákna ( $L$ ) je omnoho väčšia ako koherentná dĺžka ( $L_c$ ), potom je vlákno nazývané ako dlhé vlákno. V dlhých vláknach už nie je dvojlom jednotný z dôvodu náhodnosti odchýlok a prítomnosti módového spojenia. Dlhé vlákna môžu byť modelované ako zreteženie dvojlomových sekcií, ktorých dvojlom osi a veľkosti sa mení náhodne, ako je zobrazené na obrázku 2.3.

Dvojlom v každom úseku dlhého vlákna sa môže pridať alebo odrátať z celkovej hodnoty dvojlomu, a tak sa DGD nehromadí lineárne s dĺžkou vlákna, ako to je u krátkych vlákien. Namiesto toho sa DGD hromadí ako troj-dimenziálna náhodná cesta a v priemere rastie s druhou odmocninou vzdialenosti.



Obrázok 2.3: Model pre dlhé vlákna ako zreteženie dvojlomových sekcií s dvojlomom osi a veľkosti, ktoré sa menia náhodne po dĺžke vlákna [6].

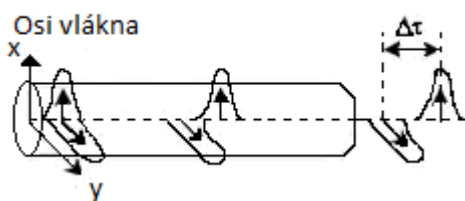
Vzhľadom k tomu, že sa módové spojenie, a teda aj DGD mení s vláknovým prostredím, by mal byť prijatý štatistický prístup pre analýzu PMD v dlhých vláknach. Prenosové systémy sú všeobecne v dlhodobom režime, a tak vlákno PMD je popísané pomocou koeficientu PMD, ktorý má jednotku v  $\frac{ps}{\sqrt{km}}$ . Vlákna, ktoré sa dnes vyrábajú, by mali mať tento koeficient menší ako  $0,1 \frac{ps}{\sqrt{km}}$ .

Na rozdiel od skôr vyrábaných vlákien, ktoré majú PMD koeficient väčší ako  $0,8 \frac{ps}{\sqrt{km}}$ . [6]

## 2.2 Diferenciálne skupinové oneskorenie DGD

Doba, kedy je polarizácia kvôli vplyvu PMD na impulz posunutá o nejaký čas, sa nazýva diferenciálne skupinové oneskorenie (DGD). Jednotkou DGD sú pikosekundy ( $10^{-12}$  sekúnd). Ovpľyňovanie DGD môže spôsobiť odchýlka popri optickom vlákne. Tieto odchýlky môžu zapríčiniť aj náhodnú výmenu svetla šíriaceho sa vláknom medzi dvoma polarizačnými rovinami. DGD sa môže meniť s vlnovou dĺžkou a časom. Koeficient polarizačnej módovej disperzie je nemenná priemerná hodnota diferenciálneho skupinového oneskorenia.[1]

Pomocou parametra DPMD je definovaná polarizačná módová disperzia.[2]



Obrázok 2.4: Vplyv PMD na časové oneskorenie [2]

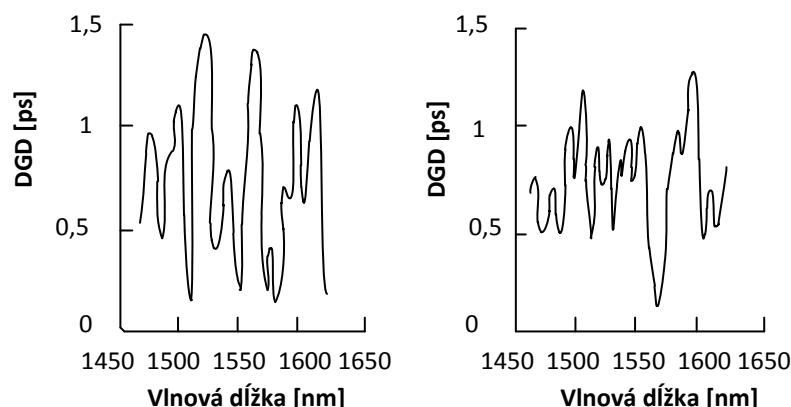
V prípade slabého módového spojenia (polarizáciu udržiavané vlákna – krátka dĺžka obyčajného vlákna), svetlo polarizované pozdĺž pomalej osi príde neskôr než svetlo polarizované pozdĺž rýchlej osi (teda rýchle a pomalé osi majú odlišné indexy refrakcie). V tomto prípade je PMD rovné DGD. V iných prípadoch (dlhé vlákna) sa optické vlákno správa ako množstvo krátkych dvojlomových prvkov pospájaných za sebou a rozloženie pomalých a rýchlych osí je náhodné v každom prvku. V konečnom dôsledku toto vyúsťuje do náhodného (silného) režimu spojenia. V takých prípadoch, kde je DGD funkciou vlnovej dĺžky a PMD, vyjadrené v pikosekundách, je priemerná hodnota DGD spektrálna distribúcia. Priemerné DGD reprezentuje druhá odmocnina dĺžky vlákna. Takže sa to počíta ako koeficient PMD vyjadrený v  $\frac{ps}{\sqrt{km}}$ .

Okrem toho 2. rád PMD vyjadruje závislosť PMD (DGD) od vlnovej dĺžky. V závislosti od prenosového okna vlnovej dĺžky danej siete je nutné testovať aj PMD pri 1310 nm, keďže PMD hodnoty môžu byť rôzne pri rôznych vlnových dĺžkach, teda medzi 1310 a 1550 nm.[7]

### 2.2.1 Štatistická podstata polarizačne módovej disperzie

Diferenciál určuje oneskorenie systému a závisí vo veľkej miere od vlnovej dĺžky a operácií v operatívnom pásme vlnových dĺžok. Avšak DGD sa taktiež mení podľa okolitých podmienok v priebehu času. Nasledujúce obrázky ukazujú, ako sa DGD a vlnová dĺžka odlišujú na rovnakom vlákne pri rôznych príležitostiach.

Obrázok č. 2.5 s grafmi ukazuje, že DGD akejkoľvek vlnovej dĺžky sa v priebehu času mení. Rozdiel môže byť až 1ps počas niekoľkých minút. Všeobecný aspekt na grafe ostáva v podstate rovnaký a štatistiky rozmiestnenia sú konštantné. Môžeme vidieť, že DGD vzhľadom na vlnovú dĺžku vytvára Maxwellovské rozmiestnenie s pomerne stabilnou strednou hodnotou za nejaký čas. Za PMD hodnoty sa väčšinou dosádzajú priemerné hodnoty rozmiestnenia vlnových dĺžok. Pre niektoré vlákna je PMD (priemerná hodnota DGD) 0,65ps.[7]



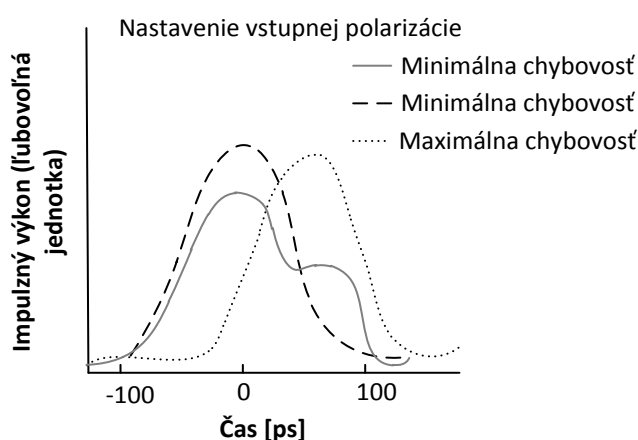
Obrázok 2.5: DGD vs. vlnová dĺžka na rovnakom vlákne, 2 rozdielne momenty [7]

## 2.3 Polarizácia svetla a dvojlom

Svetlo je vnímané ako elektromagnetické vlnenie, ktoré je opísané dvoma vzájomne kolmými vektormi, intenzitou magnetického a elektrického poľa.[3] Vektor intenzity  $E$  elektrického poľa je vždy kolmý na smer, ktorým sa šíri vlnenie. Roviny oboch intenzít nemajú stálu polohu, čo je spôsobené nepravidelným stáčaním okolo smeru šírenia. Vlnenie so spomenutými vlastnosťami je nepolarizované svetlo. Lineárne polarizované svetlo vznikne, keď jeho vektor intenzity  $E$  elektrického poľa kmitá neustále v rovnakom smere. Polarizácia je veličina, ktorá indikuje v akom smere svetlo, resp. jeho vlny kmitajú.[4] Optické prostredia, ktoré sa používajú, sa delia na izotropné a anizotropné. V izotropnom prostredí sú látky, v ktorých sa svetlo šíri rovnakou rýchlosťou vo všetkých smeroch. V anizotropnom prostredí sú látky, u ktorých je rýchlosť šírenia závislá od smeru šírenia. Práve v anizotropnom prostredí prebieha dvojlom.[3] Dvojlom opisuje, že sa svetelný lúč štiepi na dva lúče, ktoré sa šíria rôznymi smermi. Tieto lúče sa nazývajú riadny (ordinarius) a mimoriadny (extraordinarius). Obidva lúče sú lineárne polarizované. Riadny lúč dodržiava zákon lomu, čo znamená, že sa šíri rovnakou rýchlosťou nerušené od smeru šírenia. Mimoriadny lúč závisí od smeru šírenia. Keďže sa tieto lúče šíria odlišnou rýchlosťou, majú aj odlišné indexy lomu. Riadny lúč má index lomu  $n_o$ , tak ako látky v izotropnom prostredí konštantu nezávislú od smeru šírenia. Naopak mimoriadny lúč má index lomu  $n_e$ , ktorý závisí od smeru šírenia, čo je dôvodom, prečo sa pre mimoriadny lúč určuje index lomu  $a_e$  pre smer kolmý na optickú os. Mimoriadny a riadny lúč majú vektory  $E$  elektrického poľa v navzájom kolmých rovinách.[4]

## 2.4 PMD vektor

Šírenie impulzu dlhými optickými vláknami je veľmi komplikované kvôli náhodnému režimu spojenia a delenia impulzu pri každej zmene lokálnych dvojlomných osí. Prekvapujúci aspekt PMD je, že aj pri dlhom vlákne môže ešte nájsť 2 ortogonálne stavy polarizácie spustené do optického vstupu. Obrázok 2.6 zobrazuje výsledný tvar výstupného impulzu, pri 10 Gbit/s, 50% duty-cycle return to zero signálu zahájeného s rôznou polarizáciou cez 48 km vlákno s veľkou PMD. Obrázok 2.6 zobrazuje výstupný impulz pre každú z dvoch polarizačných štartov, ktoré minimalizujú BER na výstupe vlákna. Taktiež je ukázaný tvar výstupného impulzu pre polarizačný štart, ktorý maximalizuje BER na výstupe. Je zrejmé, že dva štarty minimalizujú BER výsledok v pomerne neskreslených impulzoch, zatiaľ čo impulz od tretieho spustenia sa výrazne rozširuje. Dva najmenej skreslené impulzy sú najrýchlejší a najpomalší impulz pri zahájení polarizácii.



Obrázok 2.6: Tvary výstupných impulzov pre tri polarizácie, 10 Gbit / s, duty cycle return to zero signálu cez 48-km vlákno s 60ps PMD[5]

Principiálny stavový model (PSP), ktorý pôvodne vyvinuli Poole a Wagner a pomocou ktorého popisovali tento jav, sa ešte aj dnes používa pre charakteristiku PMD. Model určuje časovú oblasť a frekvenčnú charakteristiku PMD. Uvádza sa, že na dĺžke vlákna existuje pre každý kmitočet zvláštna dvojica polarizačných stavov, tzv. hlavné stavy polarizácie. Principiálny stavový model je definovaný ako vstupná polarizácia, pre ktorú je výstupný stav polarizácie nezávislý od frekvencie prvého rádu na malom frekvenčnom rozsahu. Principiálny stavový model sa uplatňuje, keď je šírka pásma impulzov malá, s impulznými dĺžkami dlhšími ako PMD indukovaným DGD. To platí, lebo v podstate PMD je interferencialný jav, ktorý je spôsobený koherentným prídavkom komplexných amplitúd a rozmanitých impulzov vytvorených opakovaným impulzným rozdelením. V absencii polarizácie sú PSP kolmé v závislosti od polarizačne závislých strát. Každému páru výstupných PSP zodpovedá pár kolmý PSP na optický výstup. Vstupné a výstupné PSP určené jednotkou Stokes vektorov  $\hat{p}_s$  a  $\hat{p}$ , respektíve sa vzťahujú na vlákna prenosovej matice  $R$ , podobne ako sa vstupné polarizácie vzťahujú na polarizáciu optického vstupu.



Použitím PSP modelu, môžeme PMD charakterizovať pomocou PMD vektoru:

$$\tau = \Delta\tau\hat{p}, \quad (2.2)$$

vektor v trojrozmernom Stokes priestore, kde rozsah  $\Delta\tau$  je DGD. Vektor  $\hat{p}$  ukazuje smer pomalšieho PSP, vzhľadom k tomu, že vektor  $-\hat{p}$  indikuje ortogonálne rýchlejšie PSP. V Stokes priestore  $-\hat{p}$  je  $180^\circ$  z  $\hat{p}$ . Poznamenajme, že táto definícia opisuje PMD vektor v pravom kruhovom Stokes priestore, zatiaľ čo originálny PMD vektor  $\Omega$  od Poola a iných je definovaný v ľavom kruhovom Stokes priestore.[5]

## 2.5 PMD v prítomnosti stratovo závislej polarizácie (PDL)

Predpokladá sa, že PDL vo vláknach a v komponentoch sú zanedbateľné. Bolo preukázané, že dva PSP modely už nie sú ortogonálne v prítomnosti PDL. Tiež s prítomnosťou PDL dva PSP modely nie sú nevyhnutne najpomalšie a najrýchlejšie stavy a taktiež maximálny impulz šírenia môže byť väčší ako DGD. Komplexný model PMD v prítomnosti PDL je v súčasnosti skúmaný.[6]

## 2.6 Emulácia PMD

Významnou otázkou pre projektantov vysoko výkonných systémov je merať zníženie výkonu z dôvodu vysokého rozpätia PMD vo vlákne. Súčasné vlákna majú veľmi nízke hodnoty PMD, a tak vlákna s vysokou PMD nie sú komerčne dostupné. I keď by boli vlákna s vysokou PMD k dispozícii, bolo by ich ťažké použiť na rýchle preskúmanie veľkého množstva vláknových parametrov, ktoré sú potrebné pre klasifikáciu sankcií na určenie PMD. Na testovanie optických systémov, ktoré môžu byť ovplyvnené z PMD a taktiež na charakterizovanie PMD kompenzátorov je dôležité byť schopný presne napodobniť prvý i vyšší rád PMD a rýchly cyklus cez veľký počet rôznych PMD stavov vlákna.

Každý emulátor PMD, ktorý emuluje prenos pomocou komunikačného vlákna by mal mať 2 kľúčové vlastnosti:

- DGD by malo byť Maxwellovo rozložené na súbore vlákien na akejkolvek pevnej optickej frekvencii
- Priemerovaná hodnota frekvencie autokorelačnej funkcie zväzku vlákien na PMD emulátore by mala smerovať k nule tak, ako rastie frekvencia

V posledných rokoch boli pre emulátory PMD navrhnuté rôzne modely. Najľahšie realizovaný emulátor prvého rádu PMD je dĺžka vlákna udržiavajúce polarizáciu (PM vlákno). Tri populárne modely emulátorov sú - emulátor s pevnou orientáciou, emulátor s otočnými sekciami a emulátor s premenlivými DGD prvkami.[6]

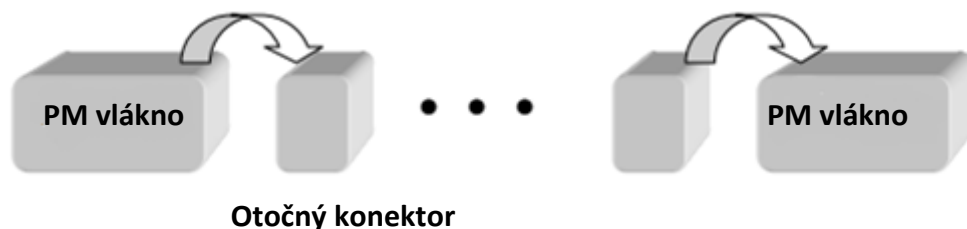
### 2.6.1 Emulátor s pevnou orientáciou

V tomto modeli je PMD emulátor realizovaný pripojením niekoľko krátkych rozpätí z PM vlákna s nejakým pevným uhlovým ohybom medzi každou časťou. Tento postup negarantuje, že emulátor má PMD vlastnosti reálneho vlákna. Avšak emulátor môže byť optimalizovaný na získanie DGD rozloženia v dobrej zhode s Maxwellovým rozložením nad súborom frekvencií. Praktické využitie týchto emulátorov je obmedzené vzhľadom k širokým frekvenčným rozsahom, ale platí, že je potrebné jeden odstrániť za cieľom získať dobre štatistiky. Musí sa predpokladať, že režim vlákna zostáva rovnaký vo všetkých frekvenciách aj pri zisťovaní iba jedného kanálu, čo nie je reálny predpoklad. Taktiež je nemožné zisťovať WDM systémy (vlnový multiplex), ktoré používajú emulátor s pevnými sekciami. Vo WDM systéme frekvencia závisí od disperzie, zisku a strát systémových

komponentov, ktoré výrazne vplývajú na výkon systému. Preto aj keby bolo možné meniť frekvenciu laserových zdrojov pri zachovaní ich stanovených odstupov, je stále nemožné reprodukovat' správny systém správania súboru rôznych vláknových realizácií. V praxi je preto použitie PMD emulátora s pevnou orientáciou veľmi obmedzené.[6]

### 2.6.2 Emulátor s otočnými sekciami

Khosravani opisuje ďalší model na napodobenie PMD pomocou otočných konektorov medzi úsekmi PM vlákien, ktoré vytvárajú súbor vysokej PMD vlákna realizovaného na náhodnom otáčaní konektorov. Presnosť štatistických vlastností PMD určených týmto modelom závisí od počtu použitých úsekov. Čím väčší počet úsekov sa používa, tým je presnosť lepšia.



Obrázok 2.7: PMD emulátor s časťami PMD vlákna rôznej dĺžky a s otočnými konektormi[6]

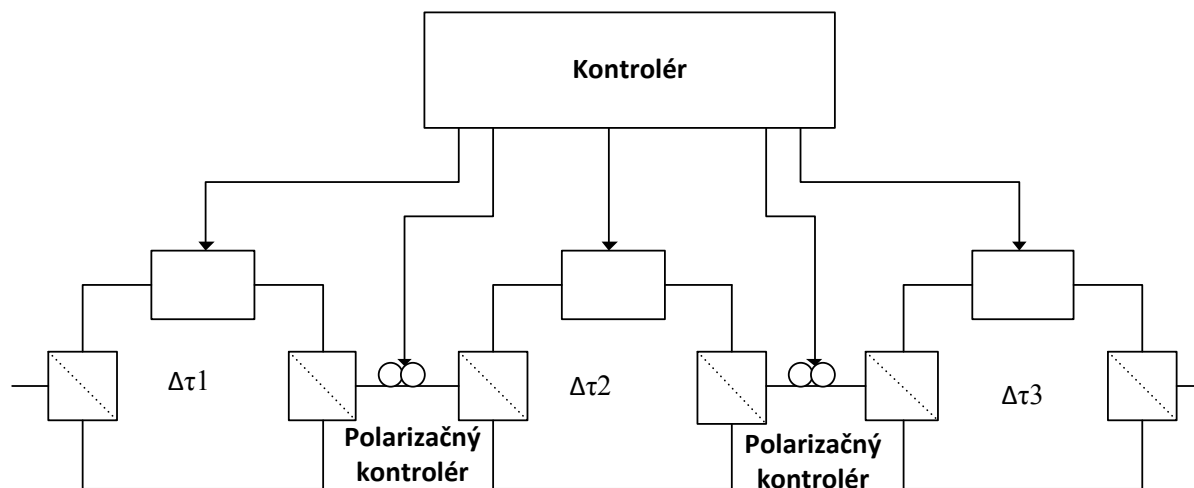
Obrázok 2.7 ukazuje experimentálne nastavenie PMD emulátora s časťami PM vlákna spojeného s otočnými- kľúčovými konektormi. Otočné konektory umožňujú polarizačným osiam akýchkoľvek dvoch susedných vlákien sa otočiť s rešpektom ku každému inému vláknu. Dĺžka PM vlákien môže byť určená pomocou Gaussovej náhodnej veličiny. Celková strata emulátora sa mení s uhlami medzi sekciami PM vlákna, ale môže byť tvorená viac rovnomerným dôkladným zvážením samotných konektorov. Veľkú zbierku DGD hodnôt možno získať napodobňovaním iného vlákna realizovaného buď zmenou vlnovej dĺžky optického nosiča po pevne uhly medzi úsekmi PM vlákien alebo otáčaním uhlov medzi jednotlivými úsekmi PM vlákna. Vo WDM systémoch nie je možné meniť optické frekvencie v širokom rozsahu.

Khosravani dokazuje, že použitím 15 častí PM vlákna, môže byť Maxwelové DGD rozloženie získané náhodným otáčaním uhlov medzi vláknami v priebehu niekoľkých časov pri pevnej vlnovej dĺžke. Tiež druhý rád PMD rozloženia je v blízkosti ideálneho druhého rádu PMD rozloženia (má formu hustoty energie prvého rádu optického solitonu). Emulátor PMD s otočnými sekciami tiež spĺňa ďalšiu podmienku požadovanú vo WDM systémoch, a to že PMD vektory rôznych kanálov by mali byť nekorelované. Khosravani ukazuje, že zanedbateľnú koreláciu medzi PMD vektormi možno získať tým, že sa vyberie vhodný výber odstupov kanálov.[6]

### 2.6.3 Emulátor s premenlivými DGD prvkami

Modely PMD emulátorov popísané v predchádzajúcich častiach vyžadujú veľký počet sekcií pre získanie požadovaných štatistických vlastností. Okrem toho konfigurácia týchto emulátorov by mala byť zmenená na napodobnenie rôznych štatistík. Navyše ešte rozdelenie pravdepodobnosti vytvorenej na týchto emulátoroch malo typicky oveľa menšiu hodnotu ako presné Maxwelové rozloženie. Lee popisuje model pre emulátor PMD, ktorý prekonáva všetky uvedené nedostatky ďalších emulátorov.

Schéma navrhovaného emulátora je znázornená na obrázku 2.8. Používa premenné DGD prvky, polarizačné regulátory a mikroprocesor. Medzi spojenými viacnásobnými premennými DGD prvkami sú polarizačné regulátory.



Obrázok 2.8: Schéma emulátora PMD s premenlivými DGD prvkami [6]

Tieto polarizačné regulátory môžu produkovať ľubovoľnú rotáciu na Poincare sfére (gule) po každom DGD prvku. Tým, že kontrolné DGD každého prvku musí Maxwellové rozloženie a polarizačné regulátory rozptýliť každý PMD vektor rovnomerne na Poincare sféru (guľu), je možné napodobenie PMD s presným Maxwellovým rozložením, bez ohľadu na počet DGD sekcií. Lee poukazuje, že je možné generovať PMD s reálnymi vláknovými vlastnosťami na určenú vlnovú dĺžku použitím iba 3 úsekov DGD prvkov. Avšak to neplatí pre WDM systémy, kde PMD vlastnosti každého kanálu by mali byť štatisticky nezávislé. Lee ukazuje, že pre napodobenie štatisticky nezávislej PMD v každom WDM kanáli, je nutné použiť relatívne veľké množstvo premenných DGD prvkov.

Model PMD emulátora opísaného v tejto kapitole ma niekoľko výhod oproti ostatným modelom. Štatisticky získané vlastnosti použitím tohto modelu sú presné, na rozdiel od ostatných modelov. Tento model umožňuje generovať rôzne štatistiky bez zmeny jeho fyzickej konfigurácie. S použitím tohto modelu je tiež možné generovať samostatne prvý a druhý rád PMD. Prvý rád PMD môže byť generovaný bez vyššieho rádu PMD, riadením iba jedným DGD prvkom. Frekvenčná závislosť PSP môže byť zahrnutá použitím ďalšieho DGD prvku. Ak chceme pridať frekvenčnú závislosť DGD, mali by byť kontrolované viac ako dva DGD prvky.[6]

## 2.7 PMD tolerancia rôznych modulačných formátov

Rôzne modulačné formáty majú rôznu citlivosť na deformáciu impulzu spôsobenú PMD. Formáty sú non-return-to-zero (NRZ), return-to-zero (RZ), pre-chirped RZ (CRZ), konvenčné solitony a disperzne riadené solitony (DMS). Experimenty na systémoch s optickým predzosilňovacím prijímačom majú preukázané, že RZ formát je viac tolerantný k prvému rádu PMD ako NRZ. Vzhľadom k tomu je PMD zvýšená a výkon v izolovaných nulách stúpa oveľa rýchlejšie pre NRZ signály ako pre RZ signály. Čo platí, lebo impulzná energia RZ signálov je viac obmedzená na stred každej bitovej pozície aj po prenose. Zvýšenie výkonu v izolovaných nulách vedie k väčším sankciám pre formát NRZ pri použití optického predzosilňovacieho prijímača. Tiež všeobecne impulzy s kratšími duty – cyklami ako RZ, CRZ, solitonové a DMS formáty dosahujú lepšie výsledky, pretože

majú širšie rozpätie, ktoré im umožní udržať ich impulzný výkon na krátky čas. Khosravani tiež ukazuje, že CRZ môže byť viac tolerantný k PMD ako RZ a NRZ. Pre CRZ impulzy, ktoré podstupujú počiatočnú kompresiu v disperznom vlákne sa priemerná disperzia upraví tak, aby maximálna kompresia na konci prenosu viedla k lepšiemu výkonu.

Konvenčné solitony sú odolnejšie voči PMD ako NRZ. Xie mal ukázať, že množstvo skupinovo-rýchlostnej disperzie (GVD) a energia solitonu má významný vplyv na solitonovú robustnosť PMD. Vďaka optimalizácii ako GVD a solitonovej energii môže byť solitonová impulzná šírka zachovaná aj pri vysokej PMD. Xie ukázal, že DM solitony sú odolnejšie voči PMD ako konvenčné solitony, a že robustnosť DM solitonov môže byť zväčšená zvýšením ako mapy intenzity, tak aj priemeru GVD. Na záver RZ, CRZ, solitony a DM solitony sú odolnejšie voči PMD ako NRZ, ale CRZ prekonáva ostatné formáty na vyššiu PMD. [6]

---

### 3 PMD a kompenzačné techniky

Je pravda, že stochastická povaha PMD znižuje dopad PMD, to ale nutne neznamená kompletne zrušenie efektu, ale len zníženie pravdepodobnosti výpadku signálu z dôvodu PMD. Jedným z riešení zníženia vplyvu PMD je výmena časti trasy, v ktorej je vplyv PMD najvyšší. Druhou možnosťou je použitie PMD kompenzátorov.

PMD kompenzačnými technikami sa vedci zaoberali v posledných niekoľko rokoch. Tieto kompenzačné techniky môžu byť rozdelené do dvoch hlavných kategórií:

- Elektrická PMD kompenzácia
- Optická PMD kompenzácia[6]

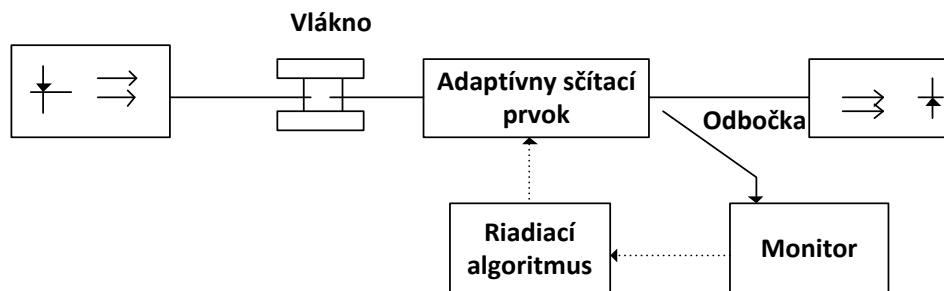
#### 3.1 Elektrická PMD kompenzácia

Elektrická kompenzácia PMD zahŕňa kompenzovanie elektrického signálu pred prijímačom, ale po fotodióde. Toto kompenzovanie môže byť zrealizované mnohými spôsobmi. Jednou z možností je použitie lineárneho transversálneho filtra (TF), ktorý je realizovaný pomocou napojeného oneskorenia vedenia modelu. TF rozdeľuje signál oneskorením kópie konštantným oneskorením etáp a prekryvaním diferenciálneho oneskorenia signálu na výstupnom porte. Ďalší spôsob ako kompenzovať PMD je použitie nelineárneho rozhodovacieho spätno-väzobného ekvalizéra (DFE). Základným princípom DFE je, že ako náhle je rozhodnuté o danom bite ako „1“ alebo „0“, inter-symbol interferencie, ktorý tento bit indukuje na nasledujúce bity, môže byť odčítaný pred rozhodovaním o budúcich bitoch. Táto metóda vyžaduje rýchle spracovanie signálu pre spojenie rozhodnutého bitu späť v čase. Iný spôsob kompenzovania je založený na rozmanitosti fázovej detekcie, kde 2 fotodiódy zisťujú signály na PSP vlákno a dedukujú DGD hodnotu. Kontrolované oneskorenie je generované na jednom ramene pred novými elektrickými spojeniami.

Elektrické kompenzačné systémy sú zvyčajne robustné a zlepšujú signál proti všetkým druhom prenosových znehodnotení. Na druhej strane sa nerealizujú tak dobre ako optické PMD kompenzátory a taktiež vyžadujú vysoko-rýchlostnú elektroniku pre lepší výkon.[6]

#### 3.2 Optické PMD kompenzátory

Cieľom optickej PMD kompenzácie je znížiť celkové PMD zhoršenie spôsobené prenosovým vláknom a kompenzátorom. Bloková schéma všeobecného optického kompenzátora je zobrazená na obrázku 3.1. Má adaptívny sčítací prvok, spätno-väzobný signál a riadiaci algoritmus.



Obrázok 3.1: Všeobecná schéma optického PMD kompenzátora[6]

Adaptívny sčítací prvok je základom každého PMD kompenzátora. Musí byť schopný odolávať PMD rušeniu a musí byť laditeľný. Vysoko dvojlomné prvky ako polarizáciu udržiavané vlákna (PM),  $\text{LiNbO}_3$  odozvy a Bragg mriežky oddelené polarizačnými regulátormi sú používané ako adaptívne sčítacie prvky. Odlišné systémy sa líšia v počte použitých dvojlomných prvkov v ich laditeľnosti a technológiách používaných pre ovládanie polarizácie. Spätно-väzobný signál je požadovaný na zásobovanie PMD informácií pre ovládajúci algoritmus kompenzátora.

Dôležité vlastnosti spätно-väzobného signálu sú:

- Jeho citlivosť na PMD
- Korelácia s BER
- Čas odozvy.

Spoločné spätно-väzobné signály používané v rôznych systémoch sú stupeň polarizácie (DOP), RF spektrálna šírka, celkový RF výkon a diagram oka.

Zo všetkých týchto DOP spätно-väzobný signál má výhody existencie nezávislej bitovej rýchlosti a taktiež má krátku dobu odozvy. Riadiaci algoritmus riadi adaptívny sčítací prvok na základe spätно-väzobného signálu. To je všeobecne realizované ako nejaký druh gradientu vyhľadávacej metódy. Parametre algoritmu sú dôkladne vyberané, aby sa zabránilo sub-optimálnym prevádzkovým bodom, čo môže mať katastrofálny vplyv na kvalitu prenosu.

Sunnerud a Karsoon predstavujú jedinečný spôsob klasifikácie optických kompenzátorov na základe počtu stupňov voľnosti (DOF) v kompenzátore, čo je počet prvkov alebo parametrov v kompenzačnom prvku, ktorý je riadený riadiacim algoritmom. DOF je dobrý odhad zložitosti, a teda aj dobrý odhad na potrebné náklady na kompenzátor.

K záveru, použitie ktorejkoľvek kompenzačnej techniky popísanej v tejto kapitole nezaručuje úplne zrušenie PMD, ale môže znížiť pravdepodobnosť výpadku signálu kvôli PMD. Použitie PMD kompenzátorov je drahá záležitosť, a to najmä vo WDM systémoch. Pretože PMD kompenzátory sú pásmovo obmedzené, každý kompenzátor môže pracovať najviac na niekoľkých po sebe nasledujúcich kanáloch. Preto na kompenzáciu PMD musí byť použitých mnoho kompenzátorov na všetkých kanáloch systému WDM. Navyše výskumníci ukázali, že využívanie moderných modulačných formátov, ktoré sú popísané v kapitole 2.7, bude mať za následok rovnaký výkon ako v prípade jednostupňových kompenzátorov. Môže sa očakávať, že reálna alternatíva bude, ak sa použijú kombinácie s kódmi, ktoré opravujú chyby prenosu.[6]

---

## 4 Meranie PMD

PMD je náročné presne určiť a namerať. Problémom je, že PMD je extrémne citlivá na podmienky merania, ako je kvalita montáže trasy, vplyv prostredia, deformácia vlákna. Ďalšie problémy v meraní zapríčiňuje aj štatistický charakter PMD. Keď vezmeme do úvahy všetky faktory, môžeme vidieť význam jednomódového vlákna, v ktorom sa uplatňuje účinná technológia na znižovanie PMD. Pri špecifikovaní požiadaviek PMD je dôležité pozrieť sa na súčasné normy. V projektovaní optovláknového spoja sa musí brať do úvahy rýchlosť prenosu a vzdialenosť prenosu. Najpresnejšia norma PMD vydaná medzinárodnou telekomunikačnou úniou odporúča  $PMD_Q < 0,2 \frac{ps}{\sqrt{km}}$ .

Táto norma môže byť vhodná pre 2,5 a 10 Gbit/s, nie je však vhodná pre systémy, kde rýchlosť prenosu údajov dosahuje 40 Gbit/s a viac. V mnohých prípadoch vysielač - prijímač tiež prispievajú k systému PMD kladúc vyššie nároky na vysokorýchlostný prenos. Pre väčšiu spokojnosť treba vybrať optické vlákna s  $PMD_Q$  menším ako  $0,06 \frac{ps}{\sqrt{km}}$ . [5]

Všeobecne typickou hodnotou PMD je 10% bitového času. Tabuľka 4.1 ukazuje PMD obmedzenia pre dané prenosné rýchlosti a konkrétne SONET/SDH systémy.

PMD je nutné merať počas prevádzky vlákna, aby bolo možné vyhodnotiť kapacitu sietí a odhadnúť možnosť vylepšenia siete pre vyššiu prenosovú rýchlosť. [1]

*Tabuľka 4.1: Porovnanie prenos. rýchlosti a limitu PMD v jednotlivých systémoch SDH a SONET [6]*

SDH	SONET	Prenosová rýchlosť [Mbit/s]	Limit PMD
	OC-1	51,84	2 ns
STM-1	OC-3	155,52	160 ps
STM-4	OC-12	622,08	160 ps
	OC-24	1244,16	80 ps
STM-16	OC-48	2489,32	40 ps
STM-64	OC-192	9953,28	10 ps
STM-256	OC-768	39318,12	2,5 ps

## 4.1 Metódy merania PMD

Metódy merania PMD možno rozdeliť do 2 oblastí:

- Metódy v časovej oblasti
- Metódy vo frekvenčnej oblasti

Metódy v časovej oblasti pracujú pomocou snímania oneskorení impulzov, zatiaľ čo metódy vo frekvenčnej oblasti zisťujú zmeny polarizácie s frekvenciou. Menšie rozsahy DGD sú potrebné pre meranie okamžitého DGD optických komponentov alebo krátke časti vlákna, zatiaľ čo väčšie rozsahy sú používané na charakterizovanie dlhých spojových odstupov.

Následne sú opísané niektoré metódy merania PMD:

- v časovej oblasti - metódy impulzného oneskorenia, modulácia fázového posuvu a interferometrická metóda
- vo frekvenčnej oblasti – metódy ako metóda Poincarého oblúku, metóda pevného analyzátoru a Jonesova maticová metóda.[6]

### 4.1.1 Metóda impulzného oneskorenia

Táto metóda je jednou z najstarších a koncepčne najjednoduchších metód merania DGD pri danej vlnovej dĺžke. Táto metóda zahŕňa spúšťanie krátkych impulzov do vlákna, rôzne vstupné polarizačné stavy a meranie maximálnej diferenciálnej doby letu použitím osciloskopu aktivovaným rovnakým zdrojom hodinové impulzu ako vstupné impulzy.

Realizácia tejto metódy je komplikovaná tým, že je potrebné hľadanie rozsahu na vstupných polarizačných stavoch na nájdenie 2 principiálnych stavov. Na rozdelenie malej diferenciálnej skupiny oneskorení sú potrebné ultrakrátké impulzy, a tak táto metóda funguje najlepšie s veľkými hodnotami PMD. Táto metóda nemeria priemerné DGD, ale iba okamžité DGD na špecifikovanej vlnovej dĺžke.[6]

### 4.1.2 Metóda modulácie fázového posuvu

V tejto metóde je okamžité DGD určené z rozdielu v modulácii fázy medzi principiálnymi stavmi polarizácie.

Vysokofrekvenčná sínusová napäťovo-modulovaná svetelná vlna je aplikovaná do vlákna. Výstup je odhalený a modulácia fázy sa meria v súvislosti s elektrickou moduláciou zdroja použitím sieťového analyzátoru. Vstup polarizácie je potom zmenený k vytvoreniu maximálneho a minimálneho zdvihu fázy. Rozdiel medzi maximálnymi a minimálnymi fázovými oneskoreniami sa používa na určenie okamžitého DGD v určitom modulačnom kmitočte, ako

$$\Delta\tau = \frac{\phi_{max} - \phi_{min}}{360f_m} \quad (4.1)$$

kde  $f_m$  je modulačná frekvencia.

Ako metóda impulzného oneskorenia je táto technika jednoduchá a intuitívna, ale vyžaduje experimentálne stanovenie PSP. Inými slovami, na určenie, ktorým stavom polarizácie odpovedajú aké PSP vlákna, musí byť meranie vykonané mnohokrát s rôznymi vstupnými stavmi polarizácie. Nevýhodou tejto metódy je, že vyžaduje stabilné prevádzkové teploty a izoláciu od okolitých rušení, preto táto metóda nie je vhodná na meranie optických vlákien v teréne.[6]

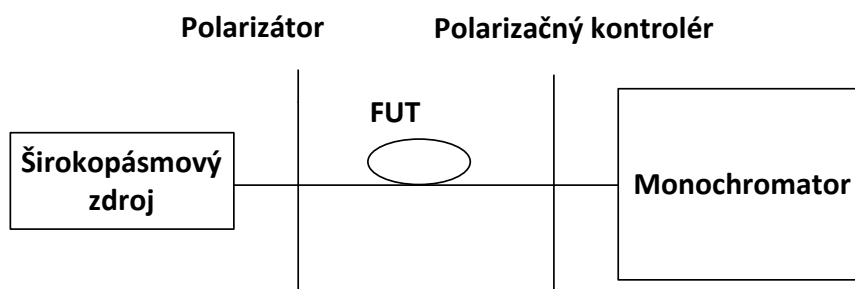


#### 4.1.3 Metóda Poincarovho oblúka

Vo frekvenčnej oblasti sa polarizačná módová disperzia prejavuje ako frekvenčne závislý stav polarizácie. V tejto metóde PMD informácie (ako PSP, DGD a závislosť vlnovej dĺžky) sú odvodené z oblúku na Poincare sfére (guli), bodom reprezentujúcim výstupné polarizačné stavy. Tieto polarizačné stavy sú ako funkcia vlnovej dĺžky pre konštantný vstupný polarizačný stav. Táto metóda môže byť použitá buď na meranie okamžitých DGD hodnôt v určitých vlnových dĺžkach alebo pre stanovenie priemerného oneskorenia cez skupinu vlnových dĺžok. Na rozdiel od iných metód merania popísaných vyššie túto metódu je možné použiť pre stanovenie vysokého stupňa disperzie meraním kompletného disperzného vektora. Taktiež metóda Poincarovho oblúka je presná pre malé i veľké hodnoty PMD, ale jej presnosť je obmedzená stabilitou testovaného vlákna. [6]

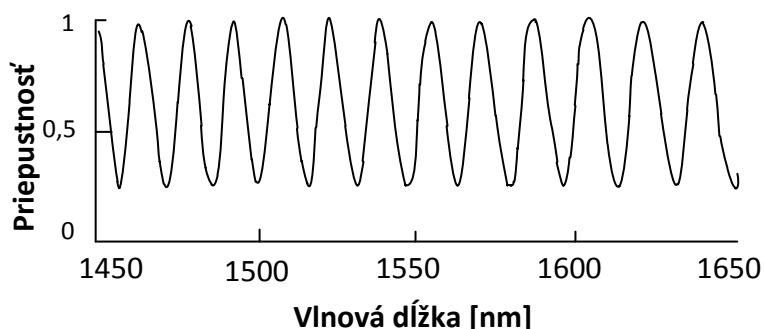
#### 4.1.4 Metóda pevného analyzátora

Metóda pevného analyzátora je často nazývaná aj ako metóda skenovania vlnových dĺžok. Metóda má obsiahnuté vyslanie monochromatického polarizovaného svetla do testovaného optického vlákna a na druhom polarizátore prebieha meranie spektrálneho prenosu.



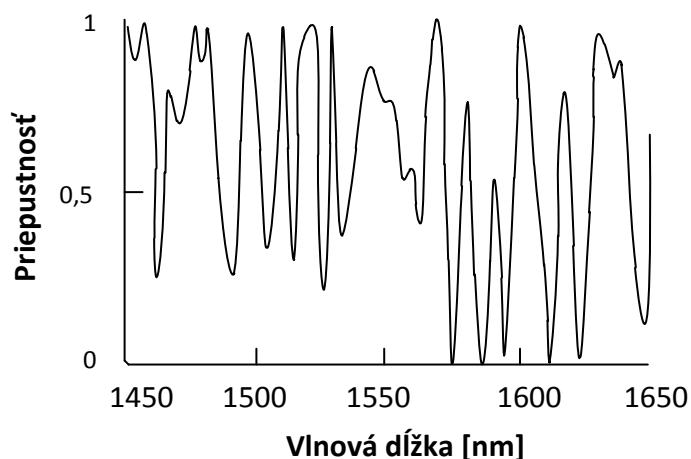
Obrázok 4.2: Zapojenie pevného analyzátora[7]

Pri skenovaní vlnovej dĺžky vyvoláva dvojdom prenosovú odozvu, ktorá má tvar sínusoidy, vid' obrázok 4.3.



Obrázok 4.3: Skenovaná vlnová dĺžka na krátkom vlákne[7]

Výpočet PMD u krátkeho vlákna je priamy - obrátená hodnota okrajového rozostupu (pri frekvencii) v metóde skenovania vlnovej dĺžky. V praxi sú dĺžky optických vlákien väčšie ako dĺžka spojenia. 50-kilometrové optické vlákno má všeobecne 0,1ps/km a dĺžka spojenia je rádovo jeden km.



Obrázok 4.4: Skenovaná vlnová dĺžka na dlhom vlákne [7]

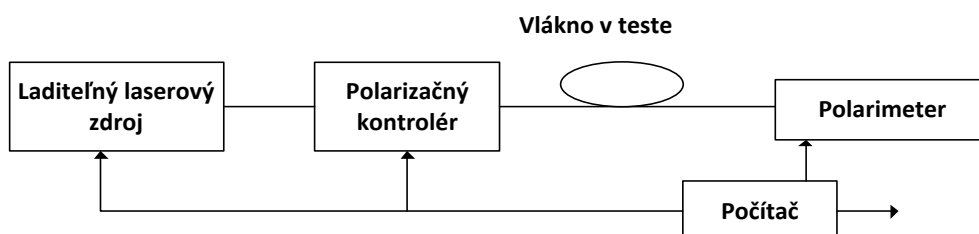
V porovnaní s krátkym vláknom je hlavným rozdielom to, že spektrálny prenos už nie je v tvare sínusoidy, ako je zobrazené na obrázku 4.4. Pri niektorých vlnových dĺžkach (v tomto prípade 1530 nm) je okrajový odstup užší naznačujú, že účinok PMD je v týchto oblastiach vyšší. V tomto prípade PMD nemôže byť definovaná takým jednoduchým spôsobom, ako to bolo pri krátkych vláknach.

Metóda používa spočítavanie hrán na rozpätí vlnovej dĺžky. Hodnota PMD môže byť vypočítaná, i keď nie je vždy jasné, čo môžeme považovať za hranu. Napríklad môžeme mať inú metódu a použiť Fourierovu transformáciu prenosového spektra, a tá je technicky veľmi podobná interferometrii. Metóda pevného analyzátoru je limitovaná rozsahom oneskorenia 60 ps a je veľmi citlivá na pohyb vlákna spôsobujúci neisté výsledky. Pre lepšiu presnosť je nutné priemerovanie, ale to zvyšuje čas potrebný na meranie. Taktiež keďže táto metóda vyžaduje skenovanie vlnovej dĺžky krok po kroku, je nutné zaistiť malý krok merania, aby bolo možné zmerať PMD.[7]

#### 4.1.5 Jonesova maticová metóda

Využíva nastaviteľný laserový zdroj, polarizačný analyzátor a polarizačný regulátor. Pri každej vlnovej dĺžke je skenovaná polarizácia regulátora a za použitia formalizácie Jonesovej matice sa vykoná matematický výpočet.

Z tejto metódy sa dá zistiť diferenciálne skupinové oneskorenie (DGD), ktoré je maximálne oneskorenie, ktoré sa môže vyskytnúť pri polarizácii na danej vlnovej dĺžke.

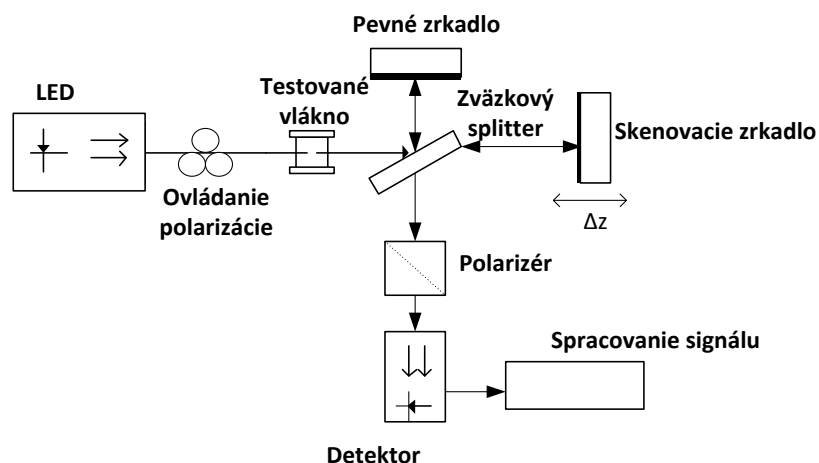


Obrázok 4.5: Jones maticová metóda a nastavenie merania DGD[7]

Pre vlákno, ktorého dĺžka je kratšia ako dĺžka spojenia, je DGD nezávislé na vlnovej dĺžke. Avšak pre dlhé vlákna je DGD závislé na vlnovej dĺžke. Preto je na určitom rozsahu vlnových dĺžok PMD vypočítaná ako stredná hodnota DGD. Typická hodnota vlnovej dĺžky je  $\pm 40$  nm okolo prevádzkovej vlnovej dĺžky.[7]

#### 4.1.6 Interferometrická metóda

Ďalšia metóda v časovej oblasti je interferometrická metóda. Táto metóda je založená na priamom meraní doby oneskorenia. Princíp interferometrickej metódy merania PMD je založený na meraní elektrického poľa autokorelácie alebo vzájomnej koherencie dvoch signálov odvodených od široko-pásmového zdroja. Táto metóda uplatňuje Michelsonov interferometer alebo Mach-Tehnderov interferometer. Interferometer je často implementovaný použitím vláknovo-smerovej spojky zostavenej z PM vlákna. Interferometrické meranie pomocou Michelsonovho interferometra je znázornené na obr. 4.6.



Obrázok 4.6: Meranie PMD interferometrickou metódou [6]

Ako je znázornené na obrázku 4.6, interferometer má rameno s pevným zrkadlom a rameno so skenovacím zrkadlom. Maximálna hodnota DGD, ktorá môže byť meraná pomocou tejto metódy závisí od maximálneho skenovacieho rozsahu skenovacieho zrkadla. Svetlo širokopásmového zdroja (ako je LED) je vyslané cez vlákno a v interferometri je rozdelené na dve časti. Tieto dve časti sú oneskorené vzhľadom na seba časovým oneskorením  $\Delta T$ , proporčným ku skenovacej vzdialenosti  $\Delta x$  od interferometrickej rovnováhy (bod kde obe cesty sú rovnakej dĺžky) dané  $\Delta T = \frac{2 \Delta x}{c}$ ,

kde  $c$  je rýchlosť svetla. Oneskorené časti v detektore opäť spojené pre ich interferenciu. Okrajový model (autokorelácia) vytvorený na detektore skenovaním zrkadlovej dĺžky je používaný na extrakciu DGD informácie.

Interferometrická metóda je použiteľná pre oba optické prvky a dlhé vlákna. Ale algoritmickejší prístup k analýze okrajového modelu je odlišný. Pre optické komponenty, ktoré sú nemódovo spojené, má okrajový model centrálny interferenčný vrchol, ak je interferometer vyvážený. Ako je zrkadlo skenované vzdialene od rovnováhy, okrajový model ukazuje dva postranné vrcholy, ktoré poskytujú DGD informácie. Pri dlhých vláknach, ktoré sú módovo spojené, okrajové modely sú zložité a analyzovať ich je náročné. Stredná hodnota DGD sa získava z okrajových modelov určením druhého momentu z okrajového rozloženia alebo pomocou Gaussianovho prekladania na okrajový model. Interferometrická metóda je znášanlivá k pohybu pozdĺž cesty vlákna v priebehu merania. Pohyb zmení údaje o interferograme, ale nie celkový tvar. Dôležitou nevýhodou tejto metódy je neschopnosť realizovať PMD merania v optických komponentoch, ktoré majú úzku šírku pásma.[6]

Tabuľka 4.2: Porovnanie metód merania[6].

<b>Metóda merania</b>	<b>Metóda impulzného oneskorenia</b>	<b>Metóda modulácie fázového posuvu</b>	<b>Metóda Poincare oblúka</b>	<b>Metóda pevného analyzátora</b>	<b>Jonesova maticová metóda</b>	<b>Interferomet. metóda</b>
<b>DGD stanovuje z</b>	vzorkovania meracieho rozsahu rôznych dôb letu medzi impulzmi v dvoch PSP	fázovej zmeny z obálky modulácie intenzity medzi dvoma PSP	rýchlosti otáčania výstupu SOP okolo osi PSP	náhodnej evolúcie výstupu SOP tak ako sa vlnová dĺžka sníma	zmeny celých intervalov vlnových dĺžok v Jonesovej matici	interferogramu získaného z umiestnenia zariadenia v interferometru s malou koherenciou
<b>Zdroj svetla</b>	chirp-free laser	chirp-free laser	Laditeľný laser	Širokopásmový zdroj svetla alebo laditeľný laser	Laditeľný laser	Širokopásmový zdroj svetla
<b>Časová alebo frekvenčná oblasť</b>	Časová	Časová	Frekvenčná	Frekvenčná	Frekvenčná	Časová
<b>Meranie citlivé na pohyb vlákna</b>	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno	Nie

---

## 5 Experimentálne meranie PMD

Meranie prebiehalo na VUT v Brne, v laboratóriu prenosových médií.

Dňa 12.4. 2013

Ako už bolo viackrát spomenuté, PMD má premenlivú hodnotu, preto pre každú dĺžku trasy bolo meranie opakované 3-krát. Hodnota PMD sa menila v rámci stotín prípadne desatín hodnôt preto bolo postačujúce meranie opakovať len 3-krát. Analyzátor skenoval vlnové dĺžky v rozpätí 1478 – 1625 nm. Meranie bolo prevádzkané pre zapojenie s emulátorom PMD i bez neho. Dĺžky trasy optického vlákna boli 5, 20, 40, 80, 100 km. Dĺžka trasy 100 km bola posledná, ktorú analyzátor dokázal zmerať. Meranie trasy o dĺžke 120 km bolo neúspešné, čo bolo spôsobené útlmom trasy. Tento útlm trasy spôsobil, že signál nebol dostatočne silný a preto ho detektor nedokázal detekovať.

### 5.1 Použité prístroje a pomôcky



Obrázok 5.1: Analyzátor EXFO FTB – 200



Obrázok 5.2: Modul PMD EXFO 5700

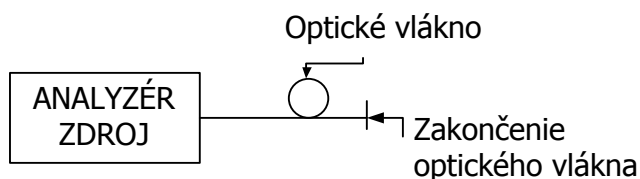


Obrázok 5.3: PMD emulátor EXFO FIXED PMD EM550

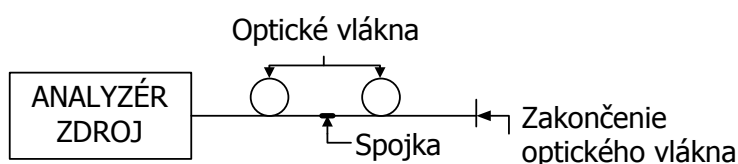
Jendnomódové optické vlákna G 652D natočené na cievke pre 5 km, 20 km, 40 km.

Pomôcky na čistenie konektorov optických vlákien.

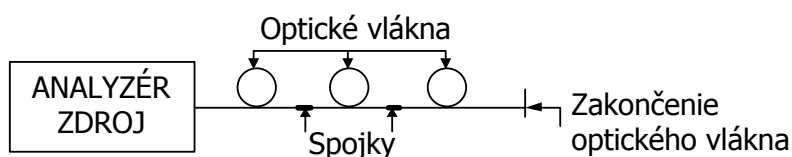
## 5.2 Schémy zapojenia



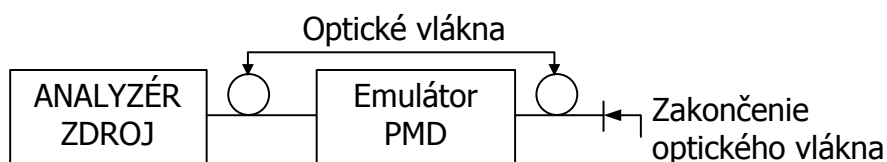
Obrázok 5.4: Schéma merania pre trasu optického vlákna o dĺžke 5, 20, 40 km



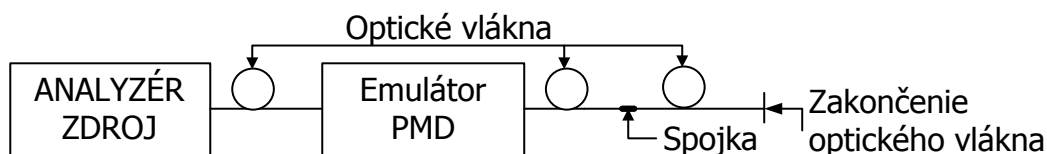
Obrázok 5.5: Schéma merania pre trasu optického vlákna o dĺžke 80 km (2x40 km optické vlákna spojené spojkou)



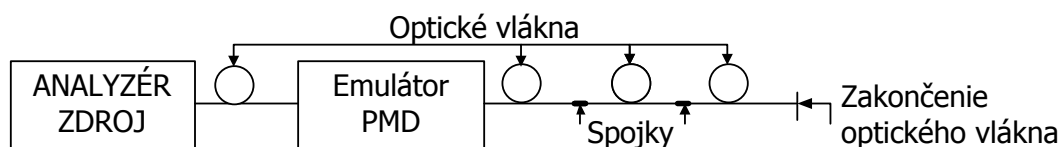
Obrázok 5.6: Schéma merania pre trasu optického vlákna o dĺžke 100 km (2x40 km a 20 km optické vlákna spojené spojkou)



Obrázok 5.7: Schéma merania so zapojeným PMD emulátorom pre trasu optického vlákna o dĺžke 5, 20, 40 km



Obrázok 5.8: Schéma merania so zapojeným PMD emulátorom pre trasu optického vlákna o dĺžke 80 km (2x40 km optické vlákna spojené spojkou)



Obrázok 5.9: Schéma merania so zapojeným PMD emulátorom pre trasu optického vlákna o dĺžke 100 km (2x40km a 20 km optické vlákna spojené spojkou)

### 5.2.1 Ukážka zapojenia



Obrázok 5.10: Experimentálne meranie PMD

Na fotografii merania je zapojenie s emulátorom, analyzér PMD, testovaným optickým vláknom.

### 5.3 Meranie PMD bez emulátora EXFO EM550

Na začiatku bola meraná PMD daného optického vlákna bez emulátora. Na hodnoty PMD vplývali jednotlivé vlákna a podmienky v ktorých boli umiestnené. Vplyv na PMD mali určite aj rôzne dátumy výroby jednotlivých vlákien, ktoré sú uvedené v tabuľke 4.1.

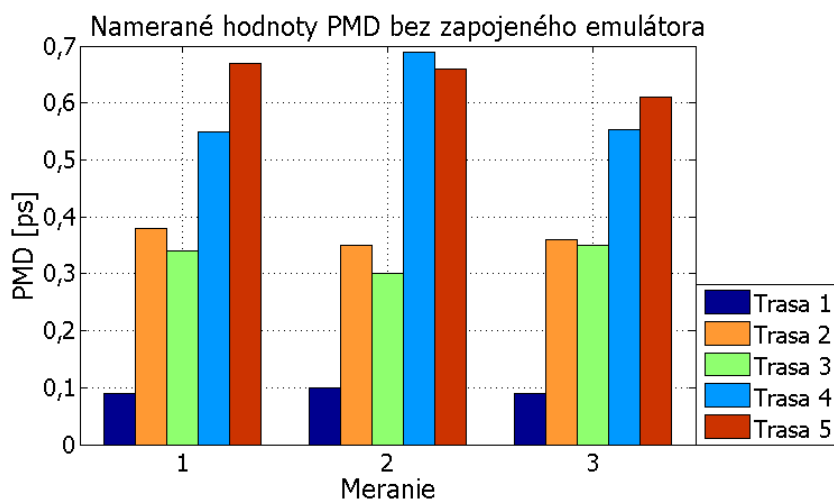
Tabuľka 5.1: Optické jedno módové vlákna G 652 D

Dĺžka vlákna uvádzaná výrobcom [m]	Dĺžka vlákna uvádzaná alyzérom [m]	Rok výroby
5118	4725	2010
20056	19995	1995
40000	40072	2012
80000 (2x40000)	80072	
100056 (2x40000 + 20056)	100065	

Tabuľka 5.2: Namerané hodnoty PMD, koeficientu a PMD 2. rádu pre rôzne dĺžky optickej trasy

					Priemerné hodnoty	
Poradie merania	Dĺžka trasy [m]	PMD [ps]	Koeficient [ps/ $\sqrt{km}$ ]	PMD 2. rádu [ps/nm]	PMD [ps]	Koeficient [ps/ $\sqrt{km}$ ]
1	4725	0,09	0,0436	0,0041	0,09	0,0446
2	4725	0,10	0,0477	0,0049		
3	4725	0,09	0,0425	0,0039		
1	19995	0,38	0,0846	0,0649	0,36	0,0814
2	1996	0,35	0,0789	0,0565		
3	1996	0,36	0,0807	0,0592		
1	40072	0,34	0,0541	0,0532	0,33	0,052
2	40072	0,30	0,0468	0,0398		
3	40072	0,35	0,0552	0,0553		
1	80072	0,55	0,0617	0,1382	0,59	0,0665
2	80072	0,69	0,0770	0,2153		
3	80072	0,54	0,0608	0,1342		
1	100065	0,67	0,0665	0,2010	0,64	0,0644
2	100065	0,66	0,0657	0,1958		
3	100065	0,61	0,0610	0,1691		





Obrázok 5.11: Graf merania PMD na jednotlivých dĺžkach trasy

V obrázku 5.11 môžeme vidieť premenlivé hodnoty pri rovnakých dĺžkach trasy. Trasa 2 mala väčšiu hodnotu PMD ako trasa 3, čo mohlo byť spôsobené tým, že optické vlákno pre trasu 2 bolo staršie. Trasa 1 merala 5 km, trasa 2 - 20km, trasa 3 - 40 km, trasa 4 - 80 km a trasa 5 - 100 km.

#### 5.4 Meranie PMD s emulátorom EXFO EM550

V ďalšej časti bola meraná PMD daného vlákna, ale so zapojeným emulátorom PMD, na ktorom sa postupne nastavovalo PMD 1, 5 a 10 ps pre rôzne dĺžky trasy optického vlákna. Vo výsledku po odčítaní nastavenej hodnoty PMD z emulátora by mala vyjsť porovnateľná hodnota ako v prvom meraní bez emulátora. Presne hodnoty PMD v emulátore boli 0,91 ps, 5,02 ps, 10,8 ps. Pri nastavovaní jednotlivých PMD hodnôt na emulátore sa mierne menili hodnoty dĺžky trasy.

Tabuľka 5.3: Namerané hodnoty PMD, koeficientu PMD pre dĺžku trasy 5 km

Počet meraní	Dĺžka trasy podľa analyzéra [m]	Nastavená PMD [ps]	Nameraná PMD [ps]	Odčítaná PMD [ps]	Koeficient [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	PMD 2.rádu [ps/nm]
1	4730	1	1,02	0,11	0,4698	0,4737
2	4730	1	0,96	0,05	0,4414	0,4188
3	4730	1	1,03	0,12	0,4758	0,4857
1	4739	5	5,30	0,28	2,4343	12,7464
2	4739	5	5,61	0,59	2,5758	14,2516
3	4739	5	4,94	-0,08	2,2685	11,0617
1	4751	10	11,66	0,86	5,3506	61,6858
2	4751	10	12,37	1,57	5,6733	69,3488
3	4751	10	11,82	1,02	5,4215	63,3310

Tabuľka 5.4: Namerané hodnoty PMD, koeficientu PMD pre dĺžku trasy 20 km

Počet meraní	Dĺžka trasy [m]	Nastavená PMD [ps]	Nameraná PMD [ps]	Odčítaná PMD [ps]	Koeficient [ps/ $\sqrt{km}$ ]	PMD 2.rádu [ps/nm]
1	19998	1	0,93	0,02	0,2079	0,3917
2	19998	1	1,04	0,13	0,2333	0,4938
3	19998	1	0,99	0,08	0,2218	0,4463
1	20008	5	5,06	0,04	1,1319	11,6262
2	20008	5	5,60	0,58	1,2511	14,2107
3	20008	5	5,78	0,76	1,2916	15,1368
1	20018	10	11,23	0,43	2,5096	57,1828
2	20018	10	12,54	1,74	2,8035	71,3566
3	20018	10	12,90	2,1	2,8841	75,5179

Tabuľka 5.5: Namerané hodnoty PMD, koeficientu PMD pre dĺžku trasy 40 km

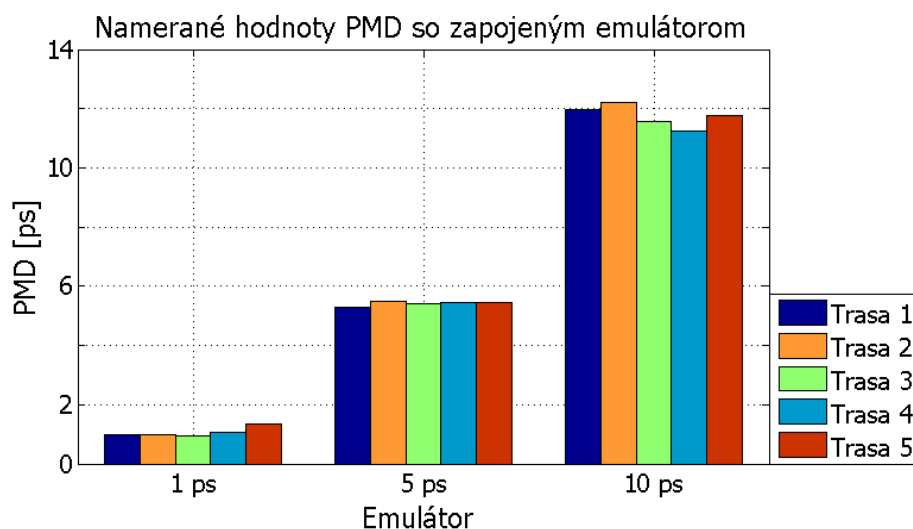
Počet meraní	Dĺžka trasy [m]	Nastavená PMD [ps]	Nameraná PMD [ps]	Odčítaná PMD [ps]	Koeficient [ps/ $\sqrt{km}$ ]	PMD 2.rádu [ps/nm]
1	40075	1	0,96	0,05	0,1516	0,4177
2	40075	1	0,86	-0,05	0,1365	0,3386
3	40075	1	1,00	0,09	0,1577	0,4522
1	40084	5	5,61	0,59	0,8854	14,2513
2	40084	5	4,88	-0,14	0,7705	10,7926
3	40084	5	5,82	0,8	0,9189	15,3505
1	40096	10	10,85	0,05	1,7134	53,3873
2	40096	10	11,97	1,11	1,8898	64,9415
3	40096	10	11,89	1,09	1,8779	64,1244

Tabuľka 5.6: Namerané hodnoty PMD, koeficientu PMD pre dĺžku trasy 80 km

Počet meraní	Dĺžka trasy [m]	Nastavená PMD [ps]	Nameraná PMD [ps]	Odčítaná PMD [ps]	Koeficient [ps/ $\sqrt{km}$ ]	PMD 2.rádu [ps/nm]
1	80075	1	1,06	0,15	0,1185	0,5097
2	80075	1	1,08	0,17	0,1204	0,5265
3	80075	1	1,03	0,12	0,1151	0,4812
1	80084	5	5,43	0,41	0,6067	13,4702
2	80084	5	6,03	1,01	0,6735	16,4760
3	80084	5	5,91	0,89	0,6602	15,9514
1	80096	10	11,22	0,42	1,2534	57,0662
2	80096	10	11,39	0,59	1,2730	58,8622
3	80096	10	11,12	0,32	1,2423	56,0626

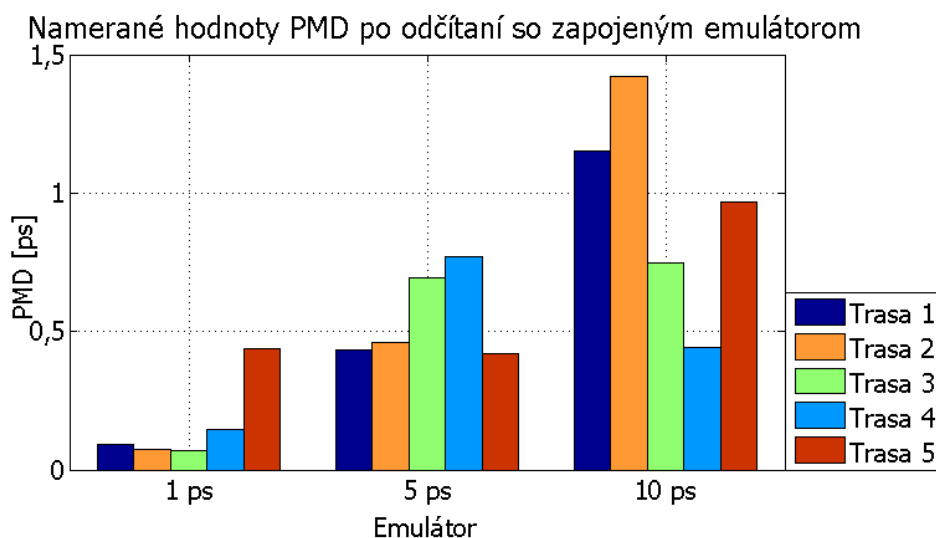
Tabuľka 5.7: Namerané hodnoty PMD, koeficientu PMD pre dĺžku trasy 100 km

Počet meraní	Dĺžka trasy [m]	Nastavená PMD [ps]	Nameraná PMD [ps]	Odčítaná PMD [ps]	Koeficient [ps/ $\sqrt{km}$ ]	PMD 2.rádu [ps/nm]
1	100068	1	1,28	0,37	0,1280	0,7436
2	100068	1	1,41	0,5	0,1406	0,8971
3	100068	1	1,35	0,44	0,1348	0,8244
1	100077	5	5,09	0,07	0,5091	11,8532
2	100077	5	5,41	0,39	0,5412	13,3951
3	100077	5	5,84	0,82	0,5839	15,4769
1	100089	10	11,83	1,03	1,1825	63,4695
2	100088	10	11,99	1,19	1,1984	65,1955
3	100089	10	11,51	0,71	1,1504	60,0785



Obrázok 5.12: Graf nameraných hodnôt PMD so zapojeným emulátorom

Na obrázku 5.12 môžeme vidieť nárast PMD pri nastavených 10 ps na emulátore. To znamená, že vlákno je pri väčšej hodnote PMD náchylnejšie na ďalší vplyv PMD. Je vidieť, že najväčšiu hodnotu PMD mala trasa 2, čo bolo vlákno s dĺžkou 20 km, príčinou toho môže byť, že toto vlákno bolo najstaršie.



Obrázok 5.13: Graf hodnôt PMD po odčítaní od nastavenej hodnoty na emulátore pre jednotlivé trasy

V obrázku 5.13 sú zobrazené spriemerované hodnoty meraní PMD pre jednotlivé nastavené hodnoty PMD na emulátore. Môžeme povedať, že aj po odčítaní nastavenej hodnoty PMD 10ps na emulátore bola hodnota PMD najvyššia. Je vidieť, že pri nastavenej hodnote PMD 10ps na emulátore pri trase 2, čo je 20 km je PMD najvyššia, na čo má vplyv to, že vlákno bolo najstaršie, a tým náchylnejšie na vplyv PMD. Pri nastavenej 1ps na emulátore PMD sa po odčítaní tejto hodnoty výsledné hodnoty približujú k hodnotám nameraných bez zapojeného emulátora.

Vyhodnotenie priemerných nameraných hodnôt normami ITU-T je zobrazené v tabuľke 5.8. Z nameraných hodnôt je vidieť, že s rastúcou dĺžkou optického vlákna rastie aj hodnota PMD danej trasy. Pri testovaných dĺžkach optických vlákien sa vplyv PMD výrazne neprejavil. Ako už bolo spomenuté, PMD sa výraznejšie prejavuje až pri dlhých vláknach (niekoľko stoviek kilometrov). Všetky merané trasy optického vlákna vyhovujú prenosovej rýchlosti 40 Gbit/s.

*Tabuľka 5.8: Vyhodnotenie nameraných hodnôt PMD pre rôzne trasy a rýchlosť 40 Gbit/s pri dĺžke optického vlákna 400 km[8]*

	<b>Trasa 1</b> 5 km	<b>Trasa 2</b> 20 km	<b>Trasa 3</b> 40 km	<b>Trasa 4</b> 80 km	<b>Trasa 5</b> 100 km
<b>Nameraná PMD</b> [ps]	0,09	0,36	0,33	0,59	0,64
<b>PMD limit podľa ITU-T</b>	2,5 ps pre 400 km a rýchlosť 40 Gbit/s.				
<b>Vyhodnotenie</b>	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje

Vyhodnotenie priemerných nameraných hodnôt PMD koeficientu je zobrazené v tabuľke 5.9. Testované vlákno by podľa nameranej hodnoty koeficientu PMD spĺňalo podmienku maximálneho koeficientu daného ITU-T pre prenos o rýchlosti 40 Gbit/s pre dĺžku trasy 400 km, a pre prenos o rýchlosti 10 Gbit/s pre dĺžku trasy 4000 km.

*Tabuľka 5.9: Vyhodnotenie nameraných hodnôt koeficientu PMD pre rôzne trasy a rôzne rýchlosti prenosu pri rôznej dĺžke optického vlákna[8]*

	<b>Trasa 1</b> 5 km	<b>Trasa 2</b> 20 km	<b>Trasa 3</b> 40 km	<b>Trasa 4</b> 80 km	<b>Trasa 5</b> 100 km
<b>Nameraný koeficient PMD</b> [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	0,0446	0,0814	0,052	0,0665	0,0644
<b>Maximálny koeficient PMD podľa ITU-T</b>	0,10 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ pre 400 km a rýchlosť 40 Gbit/s, 0,10 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ pre 4000 km a rýchlosť 10 Gbit/s				
<b>Vyhodnotenie</b>	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje

---

## 6 Záver

V súčasnosti je polarizačná módoá disperzia najväčší problém obmedzujúci nasadenie prenosových systémov s vyššími prenosovými rýchlosťami. Negatívnou vlastnosťou tejto disperzie je skreslenie signálu spôsobené časovým rozšírením prenášaných impulzov. Hlavným problémom PMD je nestabilitosť. Príčiny vplyvu PMD môžu vzniknúť už pri výrobe vlákna a taktiež rôznymi inými vplyvmi, ktoré negatívne vplyvajú na optické vlákno, ako sú ohyb vlákna, vibrácie, tlak, kvalita montáže trasy. Preto je optické vlákno potrebné testovať na vplyv PMD po výrobe, po montáži trasy optického vlákna a taktiež po tom, ako bude vlákno uvedené do prevádzky. Na meranie PMD v teréne je najvhodnejšia interferometrická metóda kvôli jej odolnosti voči okolitým vplyvom. Pri nutnosti znižovania PMD sú dve možnosti, ako to docieľiť. Prvá možnosť je výmena trasy optického vlákna, kde je vplyv PMD najväčší alebo druhá možnosť, a to použitie PMD kompenzátorov. PMD kompenzátory využívajú spätno-väzobný signál a vysoko dvojločné prvky. Pri použití PMD kompenzátorov je potrebné si uvedomiť, že sú finančne náročné a tiež pásmovo obmedzené, preto na kompenzovanie PMD je potrebné použiť niekoľko kompenzátorov.

V experimentálnom meraní boli vykonané základné testovania optického vlákna G652D na vplyv PMD. Optické vlákno bolo testované analyzéróm EXFO FTB – 200 s príslušným modulom pre testovanie vplyvu PMD, a to PMD EXFO 5700 pre rôzne dĺžky optického vlákna. Potvrdila sa nestabilná hodnota PMD, keď pri rovnakých dĺžkach optického vlákna boli namerané rôzne výsledky. Taktiež bolo dokázané, že pri zväčšovaní dĺžky optického vlákna dochádzalo k nárastu PMD. So zapojeným emulátorom sme mohli zisťovať, ako sa bude optické vlákno správať, keď bude hodnota PMD väčšia. Je zrejmé, že pri nastavenej hodnote PMD 10 ps na emulátore došlo k nárastu celkovej hodnoty PMD. Pri porovnaní nameraných výsledkov PMD s hodnotou danou normou ITU-T bolo rozhodnuté, že testované dĺžky optického vlákna sú vhodné pre prenosové systémy s rýchlosťou 40 Gbit/s. Pri porovnaní koeficientu PMD s normou ITU-T je zrejmé, že by trasa optického vlákna spĺňala podmienky pre nasadenie prenosových systémov s rýchlosťou 40 Gbit/s pri dĺžke trasy 400 km, a pre rýchlosť 10 Gbit/s až do dĺžky trasy 4000 km.

Námetom na pokračovanie práce môže byť testovanie optického vlákna na vplyv podmienok, ktoré ovplyvňujú hodnotu PMD, ako je teplota, tlak, ohyb, testovanie zaveseného a položeného vlákna.

---

## Použitá literatúra

- [1] FURUKAWA ELECTRIC NORTH AMERICA. *Polarization Mode Dispersion*. Ofsoptics [online]. 2008 [cit. 2012-10-01].  
Dostupné z: <http://www.ofsoptics.com/resources/UFOPMD.pdf>
- [2] ČERTÍK, Filip. *Modulačné techniky v optickom prenosovom médiu* [online]. 2011, roč. 4, č. 9, s. 1-15 [cit. 2012-10-01].  
Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=11599&output=pdf>
- [3] *Materiály k výuce* [online]. 2010, 18.9.2011 [cit. 2012-11-12].  
Dostupné z: <http://www.merglova.webzdarma.cz/>
- [4] *Polarizace svetla*. [online]. 2004, 6.12. 2009 [cit. 2012-11-12].  
Dostupné z: [http://projekta1fa.ic.cz/polarizace\\_svetla.htm](http://projekta1fa.ic.cz/polarizace_svetla.htm)
- [5] ANDREA GALTAROSA, CURTIS N. MENYUK, *Polarization mode dispersion* [online]. New York: Springer, 2005 [cit. 2012-08-11]. ISBN 0-387-23193-5.  
Dostupné z: [http://www.google.cz/books?hl=sk&lr=&id=EuugmOUFvkgC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Polarization+Mode+Dispersion&ots=9No7MG0SBc&sig=cf6J4A\\_WhlZjuO6fi1ao9vXP5Ws&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Polarization%20Mode%20Dispersion&f=false](http://www.google.cz/books?hl=sk&lr=&id=EuugmOUFvkgC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Polarization+Mode+Dispersion&ots=9No7MG0SBc&sig=cf6J4A_WhlZjuO6fi1ao9vXP5Ws&redir_esc=y#v=onepage&q=Polarization%20Mode%20Dispersion&f=false)
- [6] B.TECH (ELECTRONICS AND COMMUNICATIONS ENGINEERING). *Characterization of polarization – mode dispersion on buried standard single-mode fibers*. [online]. Sri Venkateswara University, Tirupathi, India, 2000 [cit. 2013-01-15].  
Dostupné z: [http://www.ittc.ku.edu/research/thesis/documents/pradeep\\_kondamuri\\_thesis.pdf](http://www.ittc.ku.edu/research/thesis/documents/pradeep_kondamuri_thesis.pdf)
- [7] JOURNAL OF COMPUTING. *Polarization Mode Dispersion (PMD), its limits, compensation and effect on optical fiber networks*. Journal of computing [online]. 2011, č. 3 cit. 2012-11-11]. ISSN 2151-9617.  
Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/64328412/Polarization-Mode-Dispersion-PMD-its-limits-compensation-and-effect-on-optical-fiber-networks>
- [8] ITU-T Rec. G.652 (06/2005)